

## 伝統的建造物保存に向けた古材の強度性能推定

Estimation of Used Wood Strength for Traditional Construction Preservation

佐々木康寿<sup>1</sup>・山崎真理子<sup>1</sup>・吉野安里<sup>2</sup>・住岡雅将<sup>3</sup>・棚橋秀光<sup>4</sup>・大岡 優<sup>4</sup>・鈴木祥之<sup>4</sup>

Yasutoshi Sasaki, Mariko Yamasaki, Anri Yoshino, Masayuki Sumioka,  
Hideaki Tanahashi, Yu Ooka and Yoshiyuki Suzuki

<sup>1</sup>名古屋大学大学院生命農学研究科 (〒464-8601 愛知県名古屋市中種区不老町)

Graduate School of Bioagricultural Sciences, Nagoya University

<sup>2</sup>長野県林業大学校 (〒397-0002 長野県木曾郡木曾町新開4385-1)

Nagano Prefectural College of Forestry

<sup>3</sup>株式会社中村建築研究所 (〒464-8601 長野県長野市妻科町407)

Nakamura Architectural Institutue

<sup>4</sup>立命館大学グローバル・イノベーション研究機構 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Global Innovation Research Organization, Ritsumeikan University

In this paper, we report on an estimation method for Young's modulus and 5 percentile strength that entails measuring only the stress wave propagation velocity of timber built into structures such as wooden buildings, without knowing timber density. This method is based on a database of wood strength performance and density accumulated from a variety of research data and estimates Young's modulus by a simulation method. The results suggest that the method of estimating strength performance presented here is valid. For example, the method is effective for convenient scientific evaluation on site when determining whether a wooden building's structural components should be reused or replaced when repairing or remodeling a building.

**Keywords :** *used wood, strength database, Young's modulus, stress wave velocity, Monte Carlo simulation*

### 1. 緒言

我が国には古来より現在に至るまで木材を構造材料として利用してきた長い歴史があり、文化財をはじめとする寺院建築物など多くの伝統的な木造古建築群がある。これらの建築物には、台風・地震など幾多の災害を乗り越えて現代までその姿を伝えているものが多くあり、我が国が世界に誇ることのできる文化的財産である。このような築年数の長い木造建築物等で大量に使用されている古材についてその特性を把握することは、これからの木材利用において更なる活用の幅を広げる上でも大変有用な結果をもたらすものと考えられる。世界に誇る伝統的木造文化の継承、そして古材の継続的利用を考える場合、古材強度特性の評価は必須である。著者らは、環境保全と伝統文化の伝承の両観点から主に古刹を対象として、伝統的構法を用いた建造物において古来より受け継がれてきた改修システムに、現代人が会得している科学的な力学評価を組み合わせ、より安全性の高い確かなシステムとして次世代へ引き継ぐ取り組みを行っている<sup>1)</sup>。本報では、信州善光寺大勸進萬善堂および滋賀県湖南市の古民家の改修・解体に当たり、部材の力学調査を行ったので報告する。木造古建築において構成部材の残存強度性能を簡便に把握することは実用上重要である。この報告では伝統的木造建築物を保存・継承し、そこに使われている古材を継続使用するための可否判断に関して、実大材の強度性能を、応力波を用いて推定したヤング係数を基に曲げ強度を推定・評価する方法を提示する。

すなわち、古材の強度的性状を解体前の構造体のままの状態では非破壊的かつ簡便に評価する方法を提示するものである。

## 2. 木材ヤング係数の新しい推定方法<sup>2)</sup>

### (1) ヤング係数の推定手順

材料中を伝播する応力波の速度と材料の密度が分かればヤング係数を求めることができる。ただし、密度を求めるためには、通常、材料全体あるいは小試片を採取して、その体積と重量を計測するが、この作業は煩雑であり、必ずしも簡単には得られない。また、小試片により得られる密度は材の局所的な値であり、必ずしもその材を代表する値とは言えない。このようなことから、ここで提示する方法は、研究蓄積が豊富で報告例の多い木材強度に関するデータベースを利用することにより、密度を測定することなく、応力波伝播速度のみからヤング係数を推定しようとするものである（特許第 4696243 号）。

材料のヤング係数  $E$ 、密度  $\rho$ 、応力波伝播速度  $v$  との間には  $E = \rho v^2$  の関係がある。ここで提示するヤング係数の推定法の基本的な考え方は、測定された「応力波伝播速度」から考え得る「ヤング係数と密度」の組み合わせを、「ヤング係数と密度に関するデータベース」をもとにシミュレーション法を用いて推定するということである。

本方法では、木材の密度について、現実の分布を模擬する任意の密度分布を乱数発生法により求める過程がある。これについて、現実の分布を正規分布等の理論分布で表し、これを用いて模擬するパラメトリック法と、実験値分布そのものを用いるノンパラメトリック法があるが、本研究では後者を採用した。

具体的手順を以下に示す。まず、実際の「ヤング係数-密度」関係（以下、これを基準データベースと呼ぶ）を用意する。

- ① 基準データベースの密度データについて、その累積頻度曲線を準備する。
- ② 任意の密度  $\rho_i$  をノンパラメトリックに抽出する。すなわち、区間  $[0, 1]$  の乱数を発生させてこれを①の密度データの累積頻度曲線に当てはめ、対応する密度データ  $\rho_i$  を得る。
- ③ 基準データベースの「ヤング係数-密度」関係について回帰直線を求める。この際、データのばらつきが不均一であり（任意の密度に対して一定のヤング係数分布を示していない）、「ヤング係数-密度」関係を単純な回帰直線で表すことが不適當であると判断される場合には、これを是正するために重み付き回帰分析（加重回帰分析）の処理を行う<sup>3)</sup>。この回帰直線に②で抽出した密度データ  $\rho_i$  を代入して、密度データ  $\rho_i$  に対応するヤング係数の平均値  $E_{iave}$  を求める。これを図 1 に示す。
- ④ 次に回帰残差を任意抽出し、これを③で求めたヤング係数の平均値  $E_{iave}$  に加えて所定のヤング係数  $E_i$  を求める。ここで、任意の密度  $\rho_i$  に対応するヤング係数の回帰残差は正規分布（平均値 =  $E_{iave}$ 、分散 =  $SD_i^2$ ）をなすものと仮定する。具体的には、中心極限定理を用いた複数の乱数による方法で標準正規確率変数  $V$ （下式）を計算し、これに基準データベースである「ヤング係数-密度」関係から求めたヤング係数の残差標準偏差  $SD_i$  を乗じて求める。すなわち、回帰残差 =  $V \cdot SD_i$  で求められる。ここで  $SD_i$  は、基準データベース「ヤング係数-密度」関係のデータのばらつきが均一な場合には、 $SD_i = \text{ヤング係数データの標準偏差} \times (1 - \text{「ヤング係数-密度」関係の決定係数})^{1/2}$  で求められ、 $\rho_i$  によらず一定となる<sup>4)</sup>。一方、データのばらつきが不均一な場合には、個々の  $\rho_i$  に対応する  $SD_i$  を何らかの方法により定める<sup>5)</sup>。このようにして得られた回帰残差を③で求めたヤング係数の平均値  $E_{iave}$  に加え、これを②で任意に抽出した密度  $\rho_i$  に対応するヤング係数  $E_i$  とする。

$$V = \sum_{j=1}^n r_j - \frac{n}{2}$$

なお、標準正規確率変数  $V$  に関する上式中、 $r_j$  は  $j$  個目の乱数を意味し、第 1 項は区間  $[0, 1]$  の一様乱数 ( $r_1, r_2, \dots, r_n$ )  $n$  個の和である。また、 $n$  は通常  $n=12$  程度で十分とされている<sup>5,6)</sup>。

- ⑤ 一方、ヤング係数  $E$ 、密度  $\rho$ 、応力波伝播速度  $v$  の関係式は  $\rho_k = E_i / v^2$  で表される。すなわち、④で求めたヤング係数  $E_i$  に実測した応力波伝播速度を対応させることにより、密度  $\rho_k$  を逆推定することができる。
- ⑥ ②~⑤を十分多数回（例えば 5000 回）繰返し、 $(\rho_k, \rho_i, E_i)$  に関する推定データ群を得る。
- ⑦ ⑥で得られた推定群のうち、図 1 に示す二つの密度 ( $\rho_k, \rho_i$ ) がある誤差範囲（例えば 5% または 1%、



以下、これを許容誤差と呼ぶ)に収まるものを、応力波伝播速度、密度、ヤング係数の三者の関係を充足しうるものとし、推定値の一つとして採用する。

以上のプロセスを「ヤング係数推定用プログラム」として作成し PC にインストールした。なお、シミュレーションにおける乱数の発生には表計算ソフト EXCEL (Microsoft 社製) の RAND0関数を用い、また、繰り返し計算の回数は 5000 回とした。

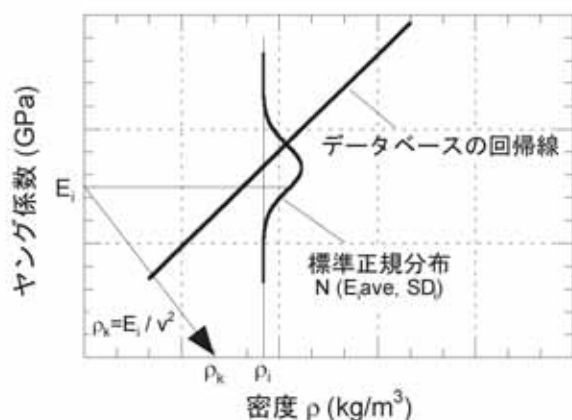


図1 モンテカルロシミュレーションによるヤング係数の推定



写真1 応力波測定器 (FAKOPP)

## (2) 製材の応力波測定と曲げ試験

ヤング係数の推定値を検証するために、製材のヤング係数を推定し、これを曲げ試験で得られる曲げヤング係数と比較した。製材の樹種は、スギ (Japanese cedar: *Cryptomeria japonica* D.Don)、ヒノキ (Japanese cypress: *Chamaecyparis obtusa* Endl.)、ペイマツ (Douglas-fir: *Pseudotsuga menziesii*) の3種 (合計 71 体) で、寸法は 120 (材幅) × 200 (梁背) × 4000 (長さ) mm、いずれも気乾状態であった。

応力波伝播速度の測定には、写真 1 に示すハンディタイプの応力波伝播時間測定器 (FAKOPP) を使用した。本機は打ち込み専用センサーに衝撃を加えると発生するエネルギー (応力波) が受信センサーに到達するまでの時間 (μs) を測定するものである。2 個の応力波センサーは、材の側面の中央部 (軸方向) に伝播距離 3800mm の間隔を置き、材表面から約 30 度の傾斜を持たせて打ち込んだ。前記の推定手順を実行する計算プログラムに、これら 2 個のセンサー間の距離と応力波伝播時間を入力すれば直ちにヤング係数 (および密度) の推定値分布が得られる。

製材の曲げ試験は、ISO 準拠の標準試験法に基づく 3 等分点 4 点負荷法により実施した<sup>5)</sup>。試験体は単純支持とし、支持点間距離 (曲げ試験のスパン L) は梁背の 18 倍である 3600mm とした。また、負荷点間距離は 1200mm、試験体の張出し部分は 200mm とした。載荷は、実大強度試験機 (島津製作所製 UH-G1000kNA、容量: 1000kN) を用いて定速変位速度 20mm/min のストローク制御で行い、最大荷重に達するまでに要した時間は 5~10 分であった。試験機付属のロードセルから曲げ荷重を、また、試験体中央下部に設置した変位計から曲げたわみを、それぞれデータロガーを用いて測定し、これらをパーソナルコンピュータに取り込み記録した。測定した荷重と中央部曲げたわみの関係から、曲げヤング係数 MOE を求めた。

## (3) ヤング係数の推定

本推定法により部材のヤング係数を推定する場合、「ヤング係数-密度」関係などの木材強度に関するデータベースを基準データベースとして使用する。本報告で使用した基準データベースは、「製材の強度性能に関するデータベース (機械等級区分データ)<sup>7)</sup>」からの抜粋である。まず、実測値の検討に先立って、応力波伝播速度を 4000 m/s と仮定した場合のヤング係数推定値について検討した。図 2 の○印は、使用した基準データベース<sup>7)</sup>である。これをもとにして推定したヤング係数を+印 (許容誤差 5%) と△印 (同 1%) で示した。本推定法は  $E = \rho v^2$  を基本原理としているので、図 2 のように推定ヤング係数と密度は比例関係を示している。図 2 から明らかなように、本推定法では測定された唯一の応力波伝播速度に対して「可能性のあるヤング係数」を分布として与えるため、ヤング係数を唯一の値で示すことはできない。図 2 に示した推定ヤング係数の分布 (ヒストグラム) を図 3 に示す。二つの密度 ( $\rho_k$ ,  $\rho_l$ ) が許容誤差範囲に収まる時の

有効データ率（前項の⑥を 5000 回繰返した時、許容誤差範囲内に収まる推定ヤング係数の数/5000）も異なり、許容誤差を厳しくすると有効データ率は低くなった。すなわち、許容誤差 5%の場合の有効データ率は 7.00% (350/5000) であるのに対し、許容誤差 1%の場合には 1.74% (87/5000) であった。ただし、ヤング係数の推定幅（最小推定値と最大推定値の差）はほとんど変わらなかった。図 3 に示す分布はほとんど正規分布に近い形になっており、ヤング係数分布の平均値±標準偏差は、許容誤差 5%の場合で  $7.19 \pm 0.87\text{GPa}$ 、許容誤差 1%の場合で  $7.16 \pm 0.74\text{GPa}$  であった。

以上のようなことから、ある値でヤング係数の代表値を示す必要がある場合には、どの値をもって代表するかが問題となる。図 3 に示すように、推定分布形は正規分布に近い形となっており、言い換えれば、この分布の平均値付近の値を推定している頻度（確率）が高いといえる。したがって、ヤング係数を唯一の値で示す場合には推定分布の平均値をもって代表する方法が考えられる。

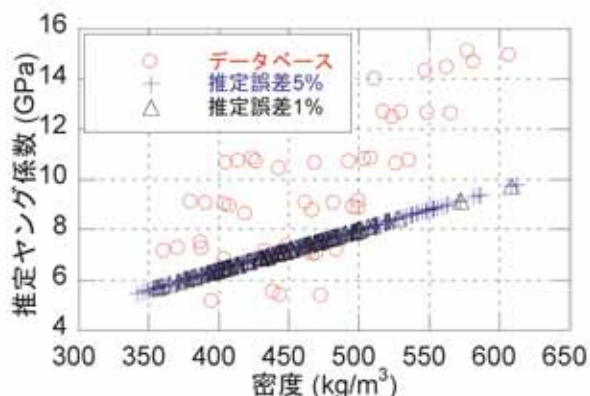


図2 基準データベースとヤング係数推定値

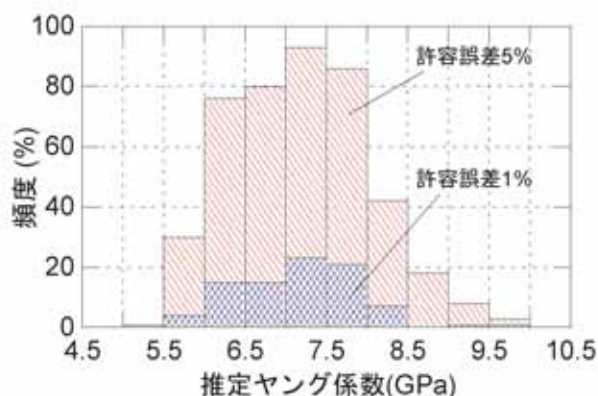


図3 推定ヤング係数のヒストグラム

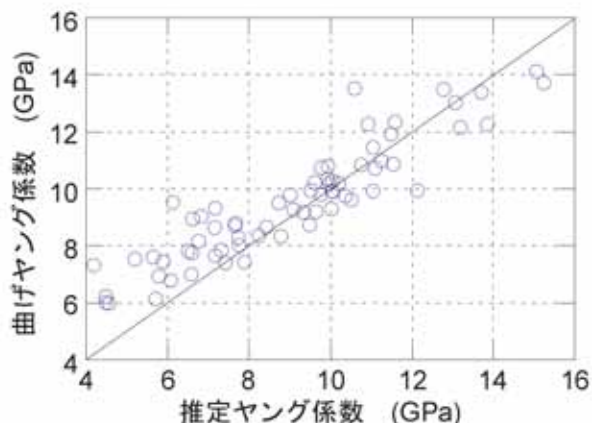


図4 推定ヤング係数と曲げヤング係数

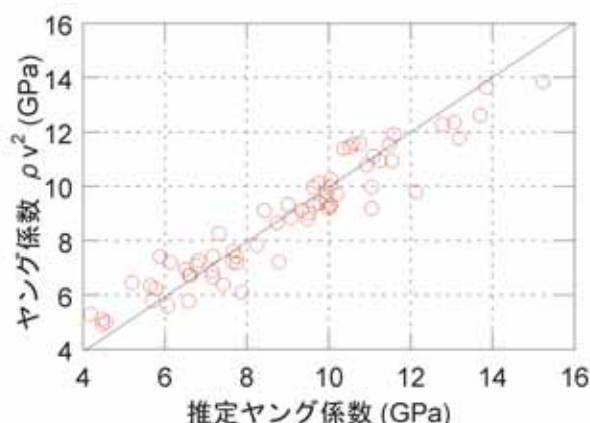


図5 応力波を基にしたヤング係数

#### (4) 推定ヤング係数の検証

次に、ヤング係数の推定値を検証するために、製材の曲げ試験で得られた曲げヤング係数と比較した。前項で述べたように、推定ヤング係数は、図 3 に示すように分布していたため、ここでは推定ヤング係数分布の平均値をもって代表値とした。曲げヤング係数と推定ヤング係数を比較したものを図 4 に示す。これによれば、推定ヤング係数の平均値は低ヤング係数域で過小評価、また、高ヤング係数域で過大評価となる傾向がうかがえるものの、両者はかなり良く一致している。推定値に及ぼす基準データベースの影響等、検討すべき課題は残されているが、図 4 の結果は本推定法によってヤング係数を求めることが可能であること、推定ヤング係数分布の平均値をもって代表値とできることを示唆するものである。さらに、製材の密度を測定し、これと応力波伝播速度からヤング係数 ( $=\rho v^2$ ) を求め、これと推定ヤング係数を比較した結果を図 5 に示す。図より明らかなように、この場合も両者は良く一致している。すなわち、図 4 で示すように応力波伝播速度のみから推定したヤング係数は、図 5 に示す密度と応力波伝播速度から求めたヤング係数とほぼ同水準の推定精度を示しており、本項で提示した新しい推定方法の妥当性が裏付けられる。



### 3. 古材の実大曲げ試験と基準曲げ強度の推定

#### (1) 供試材と曲げ試験

供試材料は、長野県長野市の古寺院（築後経過年数は約 110 年）および滋賀県湖南市の古民家（同約 170 年）で梁として使われていたもの（直径約 30～40 cm、長さ約 5～6.5 m、20 本）で、樹種はいずれもアカマツである。実大材の曲げ試験の載荷方法はスパン 5.8 m（材背の 14～18 倍）の 3 等分点 4 点負荷法による単調増加方式で行なった。その際、載荷開始から破壊に至るまでに要する時間が 5～10 分程度となるよう、載荷速度（たわみ速度）を 20 mm/min に設定し、荷重と中央たわみを測定した。なお、実験前に供試材の損傷・欠損状況等を観察記録した。

#### (2) 応力波伝播試験とヤング係数の推定

第 2 章に示す方法にしたがった。

#### (3) 実大曲げ試験の結果と考察

曲げ試験で得られた荷重とたわみの関係より、曲げヤング係数（MOE）と曲げ強さ（MOR）を計算し、両者の関係を求めると図 6 のようになる。供試材は様々な欠損を含んでおり、形状も不定である。この図の MOR、MOE の評価にあたっては、これらの欠損を無視した中実の材と仮定し、断面寸法についても末口及び元口寸法の平均値から、楕円形あるいは矩形を仮定して断面係数を求めた。したがって、算出された MOR、MOE は真値に対して過小に評価されていると考えられる。すなわち、図 6 からわかるように、MOR は 16～40 MPa、MOE は 5～12 GPa に分布しており、木材の一般的な値よりも小さく評価された。これに対して図 7 は、応力波伝播速度からシミュレーション法により推定したヤング係数を横軸にとり、これと MOR（図 6 と同値）との関係を示した。図 6 に比べてプロットが全体に右方向に移動しているのがわかる。これは、応力波伝播速度を基にしたヤング係数は、欠損の有無・不定形状に関わらず材料実質の物性を表現するため、図 6 の MOE より大きく評価されるためである。したがって、図 7 ではヤング係数に比して曲げ強さが小さい印象を与える。破壊の様子としては、負荷点近傍に切欠きが、また切欠き内には貫通穴が存在していたものでは、この切欠き付近から折損した。また、負荷点間に貫通穴や切欠きがあるものは、これらの貫通穴、切欠き部から折損し破壊した。

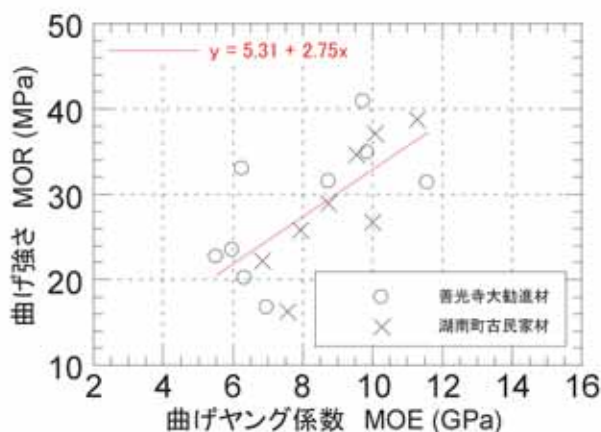


図 6 曲げヤング係数と曲げ強さの関係

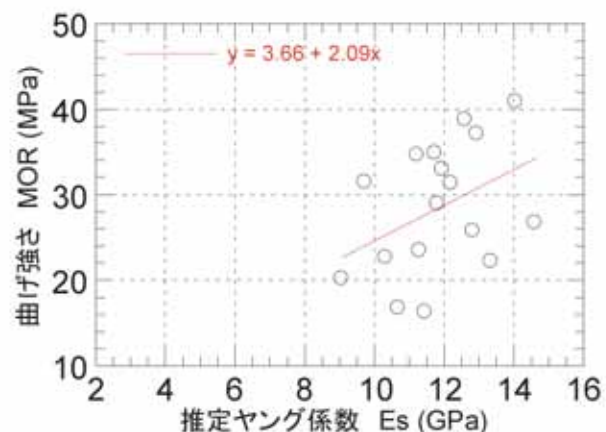


図 7 推定ヤング係数と曲げ強さの関係

#### (4) 古材の基準曲げ強度の推定

上記の曲げ試験で得られた曲げヤング係数と曲げ強さの関係（図 6）をもとにして、シミュレーション法を用い、古材の曲げヤング係数と曲げ強さに関するデータベースを作成する。これより、古材の基準曲げ強度を提示する。

まず、オリジナルデータとなるのは図 6 に示す曲げヤング係数と曲げ強さの関係である。次に、応力波伝播速度からモンテカルロシミュレーションにより推定したヤング係数  $E_s$ （図 7 の横軸）と無垢古材（切欠

きが無い、古材の製材に相当するもの)の推定 MOR の関係を求める。無垢古材の推定 MOR とは、図 7 の縦軸の(見かけの) MOR を「断面係数 Z の低減係数」で除したものである。これは、図 7 の縦軸の MOR について、切欠きのない無垢材であった場合の補正を施す、すなわち、「断面係数 Z の低減係数 Kr」で MOR を除すことである。Kr については、スパン全体において有効断面の梁背が最も小さい欠損により評価し、低減係数 Kr を以下のように定義した。この中で Ke 値は断面係数に対する低減係数である<sup>8)</sup>。

$$Kr = Kh \times (Ke \cdot Kb)^{3/2}$$

Kr を用いて、(見かけの)曲げ強度 MOR を補正し、欠損のない無垢材としての古材の曲げ強度 MOR' を推定した。具体的には  $MOR' = MOR / (Kr)^{2/3}$  で求めた。また、この状態ではデータ数が少ないため、モンテカルロシミュレーション法を用いて、本実験結果の Es-推定 MOR' 関係の特徴を有するデータ群を模擬的に作成する。このとき、模擬データのヤング係数分布は、アカマツ新材製材の実大試験データベースに倣うものとした(ノンパラメトリック法)。また、古材の基準強度導出にあたってのシミュレーションでは、推定 MOR' の標準偏差が必要となる。アカマツの実大曲げヤング係数の最小値は 5GPa であるが、今回の実験データは高ヤング係数域のものしかないので、図 7 のデータ群を左側へ平行移動させ、模擬的にデータを拡張した。図 8 に拡張データを示す。

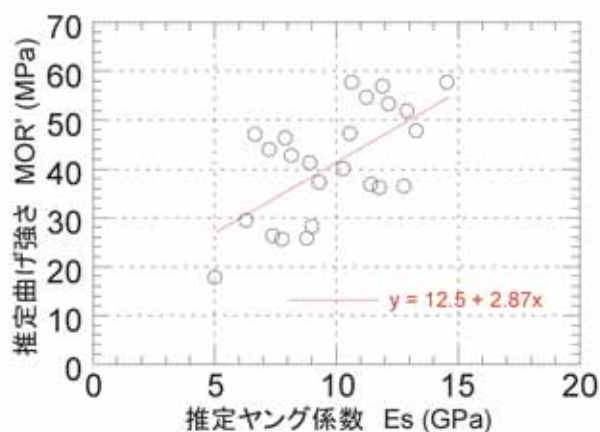


図 8 ヤング係数と曲げ強さの拡張データ

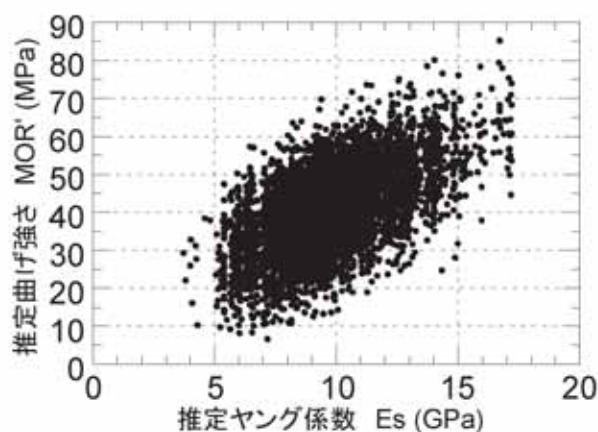


図 9 ヤング係数と曲げ強さのデータベース

以上より、モンテカルロシミュレーション法を用いて作成した模擬 Es-推定 MOR' データは図 9 の通りである。すなわち、図 9 に示すデータ群が古材(アカマツ無垢材)5000本の曲げヤング係数と曲げ強度の関係と考えることができる。

図 9 の模擬データを基に、基準強度を導出する。この模擬データを新材のヤング係数区分に応じた群に分け、各群の曲げ強度の 5% 下限値を求め、基準強度とした<sup>9)</sup>。それによれば、低ヤング係数域の等級(E70, E90)では新材と比べて強度値が大きく、逆に、高ヤング係数域の等級(E110, E130, E150)では、新材と比べて強度値が小さくなった。このようになった理由の一つに太鼓材の強度が製材強度より大きいことが考えられる。ただし、今回の実験では低ヤング係数域のデータがなく、高ヤング係数データから外挿した仮定値であること、無垢古材の推定 MOR' は最大切欠きのみを考慮して推定した値であるが、実際の試験体は複数の切欠きを有しており、真値はこれより大きいと考えられる(すなわち安全側の評価となっている)こと、ヤング係数の変化に対する曲げ強度の変化がアカマツ新材より鈍いことなどに留意しておく必要がある。

図 9 のデータ群に基準強度(Fb 値)を書き加えると図 10 の階段状のラインのようになる。この図には、アカマツ新材のデータ群<sup>7)</sup>および今回の実験値(拡張データを含む)も書き加えた。

## (5) 基準強度の検証

上記のようにして導出した古材(アカマツ)の基準曲げ強度について、今回の実験で得られている 17 本の古材の強度性能を検証した。すなわち、応力波伝播速度からシミュレーション法により推定したヤング係数 Es (図 7) をもとにすれば、図 10 より基準強度(Fb 値)を知ることができる。この基準強度に対して材料に含まれる欠損等を考慮して低減係数を乗じ、 $Fb \times (Kr)^{2/3}$  を求めると、この値がその材に最低限保証さ



れた強度値と考えることができる。この値に対して実際に実大曲げ試験により得られている曲げ強度（MOR）との関係をプロットすると図 11 のようになる。これによれば、実験で得られた曲げ強度（縦軸の MOR）が横軸の強度値を上回っており、安全側の評価となっていることがわかる。

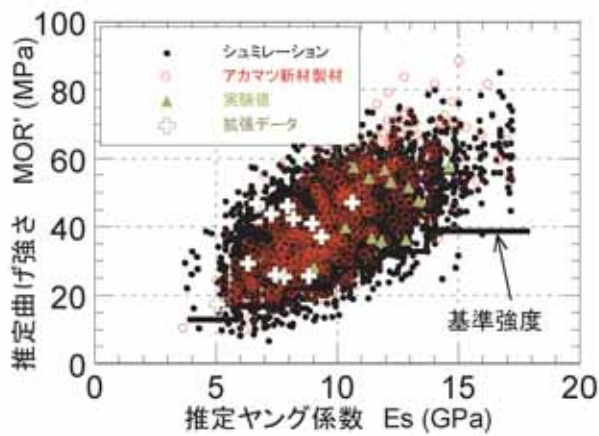


図 10 古材の曲げ強度

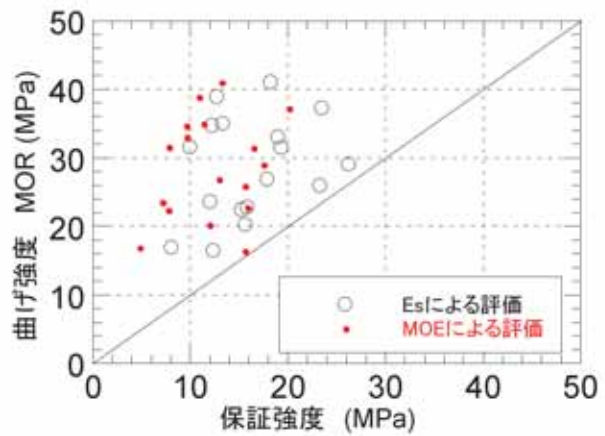


図 11 基準強度の検証

#### 4. まとめ

本報告では、新しく提示したヤング係数推定法の有効性を示した。この方法によれば、材料の密度を知ることなく、応力波伝播速度のみから部材ヤング係数を推定することが可能である。構造物に組み込まれた状態で部材のヤング係数を推定することも可能であるため、木質構造物の保守管理に役立つものと期待される。また、未解体の建物に組み込まれた状態の木材（古材）の強度は、以下のようにして推定することができる。

- ① 応力波伝播速度を測定し、これよりシミュレーション法により材のヤング係数（ $E_s$ ）を推定する。
- ② 材の欠損状況を調べ、断面の低減係数（ $K_r$ ）を算出する。
- ③ 推定ヤング係数（①で求めた  $E_s$ ）より図 10 を用いて基準強度（ $F_b$ ）を求める。
- ④ 基準強度（③で求めた  $F_b$ ）と断面低減係数（②で求めた  $K_r$ ）よりその材に最低限保証される強度を算出し、この値を設計強度に用いる。

なお、図 9 に示した模擬データをより正確なものにするために、古材の強度試験を継続的に実施し、データの蓄積をはかることが重要である。また、応力波伝播時間測定器とレーザー距離計および本推定プログラムを組み合わせた携帯型木材強度測定器の開発が期待される。

**謝辞：**本研究の一部は平成 23 年度国交省「伝統的構法の設計法作成及び性能検証実験」検討委員会（委員長：鈴木祥之立命館大学教授）の古材に関する調査研究として実施した。ご協力頂いた関係各位に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 佐々木康寿、山崎真理子、杉本貴紀：応力波を用いた木質構造部材の非破壊検査—その 2 古刹寺院小屋梁の現場測定—、日本建築学会 2009 年度大会（東北）学術講演梗概集 A-1, 375-376, 2009
- 2) Yamasaki, M.; Sasaki, Y.: Determining Young's modulus of timber based on a strength database and stress wave propagation velocity. Part 1: A new estimation method of Young's modulus employing Monte Carlo simulation, *Journal of Wood Science*, 56, 4, 269-275, 2010
- 3) 山崎真理子、平嶋義彦、佐々木康寿：建築解体木材の強度特性、日本建築学会構造系論文集, 588, pp.127-132, 2005
- 4) 平嶋義彦、杉原未奈、佐々木康寿、安藤幸世、山崎真理子：古材の強度特性（第 1 報）、ケヤキおよびアカマツの引張強度特性、木材学会誌, 50(5), pp.301-309, 2004
- 5) 星谷 勝、石井 清共著「構造物の信頼性設計法」pp.22-23, pp.84-85(1986)鹿島出版会、東京。
- 6) 宮川公男著「基本統計学（第 3 版）」pp.162-165, pp.195-199(1998)有斐閣、東京。

- 7) 森林総合研究所強度性能研究会：「製材品の強度性能に関するデータベース」データ集<7>，(2005).
- 8) 日本住宅・木材技術センター「木造軸組工法住宅の許容応力度設計（2008年版）」，P-103.
- 9) 堀江和美「木材強度データの確率・統計手法」

### 参考：古刹の改修事例

ここで示した手法を用いて部材の強度性能を調査し、古材を再利用して改修した古刹の一例を以下に示す。物件は長野県須坂市にある古寺院の庫裏で、築後経過年数は約180年であった。



写真2 改修前



写真3 応力波測定



写真4 解体



写真5 解体された古材



写真6 再建改修



写真7 改修後